

**Diagnostic de nutrition azotée au champ de la canne à sucre
par mesure photométrique au chlorophylle-mètre (spad)**

D Pouzet , P F Chabalier, A Velle

Février 2007

Introduction

L'azote détermine le niveau de rendement en canne si l'alimentation en eau est par ailleurs suffisante. La quantité d'azote absorbée par la canne détermine également le niveau d'absorption des autres éléments nutritifs si ceux-ci sont disponibles dans le sol. La phase intense d'absorption en N se situe entre le 3^e et le 6^e mois après la coupe, à raison de 4 à 6 kg/ha/jour. Chaque tissu de la canne présente une teneur en N caractéristique : méristèmes, limbes, fouet, entre-nœuds.

La capacité d'absorption de l'azote diffère selon les variétés, puisque l'on observe des taux d'azote foliaire différents selon les variétés. Il en est de même pour la couleur qui est caractéristique de la variété, du fait de la teneur en azote et aussi de la présence de certains anthocyanes. Egalement, la tolérance à de forts apports azotés varie en fonction de la variété.

A La Réunion, par exemple, les variétés R570 et R579 ont des teneurs assez proches en N et plus élevées que celle de la variété R575.

La carence en azote a des effets dépréciatifs : réduction du tallage et de la croissance, feuilles jaunissantes qui meurent prématurément, diminution du rendement en canne. En revanche, la carence azotée favorise l'augmentation de la richesse (teneur en saccharose) et la diminution de la teneur en sucres réduits (mais cela ne compense pas la diminution de rendement en sucre).

La fertilisation azotée d'entretien de la canne à la Réunion est établie au moment de la replantation, à partir d'informations sur les besoins de la culture, donc de son rendement prévu, et sur la capacité du sol à fournir de l'azote à partir de sa matière organique (coefficient de minéralisation selon le type de sol et teneur en matière organique). Le laboratoire d'analyse du Cirad propose des fertilisations raisonnées sur la base d'une analyse de sol et des rendements espérés.

Le conseil donne donc une valeur moyenne annuelle d'apport d'azote pour les 5 à 8 ans séparant deux replantations. Mais, il est conseillé de diminuer la dose sur la vierge (fourniture de N élevée par le sol du fait d'une sur-minéralisation due au travail du sol) et de renforcer la fertilisation azotée sur les dernières repousses, dont les systèmes racinaires sont moins puissants.

Le contrôle de la nutrition azotée de la canne est effectué si il y a un besoin particulier, par mesure de la teneur en azote des feuilles, selon la technique du diagnostic foliaire (DF)¹.

Des études sur le calage de seuils de teneur en azote par le diagnostic foliaire sur la R 570 ont été réalisées dans les années 90 à La Réunion.

Tableau 1 : grille d'interprétation du Diagnostic foliaire pour la nutrition azotée de la canne à sucre variété R 590

Age (mois)	Diagnostic de nutrition azotée (N g/kg)				
	Carence	Faible	Normal	Fort	Excès
5	12,1	12,9	13,6	14,3	15,1
7	11,7	12,5	13,2	13,9	14,7

Problématique

Vu les conditions de culture, il est difficile de fractionner les apports d'azote et d'effectuer des apports complémentaires en cours de cycle, sauf en cas de canne conduite sous goutte à goutte. Mais certains agriculteurs de l'Est ont déjà l'habitude de le faire (technique facilitée par l'utilisation d'enjambeurs) et nous conseillons, selon les zones de culture, de généraliser cette pratique. La connaissance de l'état nutritionnel en N de la canne est alors un outil de conduite de cette fertilisation. Cette technique de fractionnement fait partie des recommandations de la fertilisation raisonnée sur toutes les cultures. C'est le cas de la méthode de conduite par fractionnement que développe ARVALIS (l'institut du végétal) sur les grandes cultures en métropole.

L'emploi d'un appareil de type chorophylle-mètre est alors très utile pour avoir les données rapidement sur la nutrition azotée et pouvoir raisonner les apports en cours de cycle. Il existe d'autres méthodes utilisant des outils plus complexes comme le fluorimètre, développé par la Sadef, et surtout utilisé sur des cultures pérennes comme la vigne et les arbres fruitiers.

Des tests directs basés sur la mesure instantanée au champ de la teneur en chlorophylle des feuilles ont été développés et sont opérationnelles sur de nombreuses cultures. Il s'agit de mesures de couleur dont l'unité caractérise l'absorption par la chlorophylle d'un rayonnement infrarouge traversant le limbe.

L'appareil utilisé est le SPAD 502 de Minolta™ adapté aux mesures au champ. L'appareil mesure la teneur en chlorophylle en analysant la lumière transmise par le limbe dans le rouge et le proche infra rouge. SPAD est l'abréviation de « Soil And Plant Analyze Developments »

(développements pour l'analyse du sol et des plantes). Le Spad donne une mesure numérique comprise entre 0,0 et 99,9 (unités SPAD) qui est corrélée à la teneur en chlorophylle, elle-même corrélée à la teneur en azote. D'après la bibliographie, la couleur semble généralement mieux reliée au rendement que l'azote du fait vraisemblablement d'une consommation de luxe en azote.

En fonction du résultat de la lecture, en passant par des grilles d'interprétation du niveau de nutrition azoté de la canne à sucre, il serait alors possible de proposer des apports complémentaires de N en cours de cycle, voir sur les cycles suivants lorsque les repousses commencent à présenter des rendements en forte décroissance du fait d'une carence en N.

Résultats sur la canne

A) Essai préliminaire

A la Réunion, une étude préliminaire a été menée par le CIRAD sur la station de la Bretagne (Pouzet D. et al, 2003).

Ce premier essai de 'La Bretagne' a couvert deux campagnes de récolte, soit une culture de vierge suivie d'une première repousse. La culture de vierge a été implantée en 2001 tard dans la saison, sur une parcelle irriguée implantée derrière une vieille jachère.

Les mesures ont été faites sur 18 parcelles croisant les 6 cultivars de canne à sucre réunionnais : R570, R 579, R 575, R 572, R 577 et R 573 et trois doses d'azote (0, 135, 300 unités d'azote par hectare). Il n'y a pas eu de répétition sur cet essai.

Les mesures correspondaient à des couples de données {couleur - teneur en azote}. Elles ont été réalisées selon le protocole des diagnostics foliaires de la canne à sucre. L'échantillonnage a porté sur le tiers médian des limbes des trois premières feuilles dont la ligule est visible (feuilles entièrement déroulées ou feuilles sous TVD¹), 3, 5 et 7 mois après la récolte : soit 18 couples de données répétés trois fois par an.

Six talles ont été sélectionnées sur chaque parcelle. Le tiers médian de chacune des trois feuilles échantillonnées de chaque talle a été mesuré six fois pour la couleur puis prélevé pour une analyse d'azote. Chaque couple de données correspondait donc à la moyenne de 108 mesures de couleur (6 mesures * 3 feuilles * 6 talles) et à la teneur en azote d'un échantillon moyen constitué du mélange des 18 tiers médians prélevés.

Azote / couleur

L'étude statistique² montre qu'il est possible d'estimer la teneur en azote d'une feuille de canne à sucre à partir d'une mesure de couleur³ avec une bonne précision ($R^2 = 0,6077$; $CV = 16,3491$; $RMSE = 2,6386$; $Pr > F : < .0001$), selon le modèle linéaire suivant :

$$N \text{ (g/kg)} = -7,0611 + 0,5316 * \text{Couleur (unité SPAD)}$$

Effet cultivar

Toutes les courbes par cultivar sont parallèles. L'analyse statistique permet de distinguer les cultivars R 577 et R 575 des autres.

Les droites de régression des cultivars R570 et R572 sont confondues. Celles des cultivars R577 et R575 sont caractérisées par des ordonnées à l'origine plus faible que les autres.

Le graphe des droites de régression de chacun des trois groupes (figure 1) montre bien le parallélisme des différentes régressions, qui ne diffèrent les unes des autres que par l'ordonnée à l'origine .

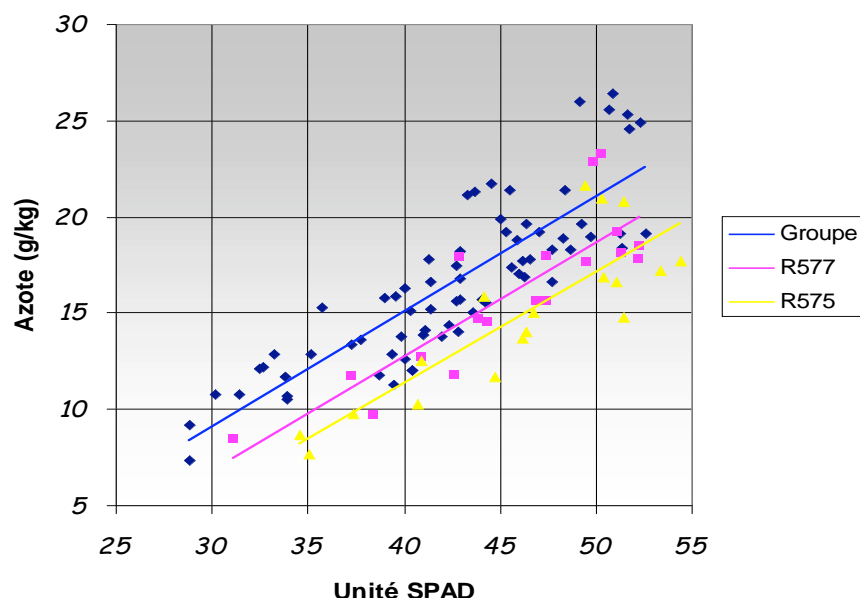
La connaissance du groupe variétal permet d'évaluer l'azote avec une meilleure précision

¹ Top Visible Dewlap (ochrea ou ligule)

² SAS[™], procédure GLM (Global Linear Model)

³ Moyenne de 6 mesures par feuilles, 3 feuilles par talle et 6 talles soit 108 mesures.

Figure 1 : courbes de régression linéaire pour les trois groupes de cultivars



La régression linéaire ajustée au groupe de cultivars : R570, R579, R573 et R572, permet, à partir d'une mesure de couleur, d'estimer la concentration en azote et un intervalle de confiance à 95% de cette estimation.. Il s'applique à des estimations d'azote comprises entre 8 et 25 g/kg de MS. L'équation de la droite de régression permet le calcul de l'azote connaissant la couleur :

$$\text{N g/kg de MS de la feuille} = - 8,92 + 0,598 * \text{couleur (pour R 570, R579, R 573, R 572)}$$

(estimation à 95 % de ± 4.46 g/kg, $t = 1.99$)

Les modalités de calcul sont légèrement différentes pour les deux autres cultivars échantillonnés dont la réponse indique une couleur spécifique différente :

$$\text{N g/kg} = - 10,91 + 0,590 * \text{couleur (pour la R577)}$$

(estimation à 95% de $\pm 4,57$ g/kg)

$$\text{N g/kg} = - 11,72 + 0,575 * \text{couleur (pour la R575)}$$

(estimation à 95% de $\pm 4,71$ g/kg)

La valeur du t (2.11) est identique dans les deux cas. Les plages de validation sont comparables.

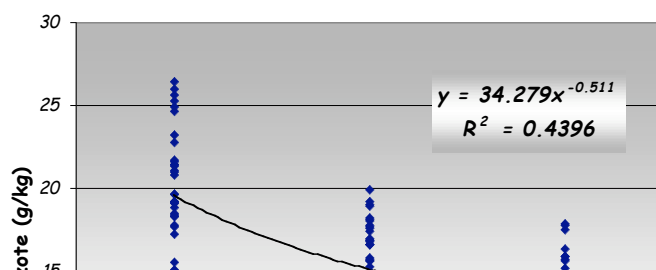
Couleur et rendement

Si les liens entre le rendement et la couleur sont évidents d'après les résultats obtenus, la nature du dispositif ne permet pas une analyse plus fine.

Couleur et âge

La teneur en N varie avec l'âge, mais la relation avec la couleur reste la même statistiquement. Les couples azote- couleur peuvent donc être considérés indépendants pendant toute la croissance de la canne. L'étude des corrélations est donc justifiée.

figure 2 : relation entre l'âge et la teneur en N des feuilles



Conclusion

La mesure de la couleur de la feuille semble pouvoir se substituer à l'analyse de la teneur de l'azote de la feuille, avec une précision suffisante pour l'objectif recherché.

Les erreurs que l'on peut faire lors d'un diagnostic foliaire classique sont du même ordre de grandeur. On peut donc remplacer le DF-azote par le diagnostic couleur (ou DC).

Cette méthode permettrait d'obtenir des résultats instantanés, de faire le diagnostic au champ et d'envisager une stratégie de fertilisation : impasse, fertilisation de complément modeste ou importante selon les conditions.

B) essai de confirmation

Les mesures ont été réalisées à partir de 2004 sur un essai implanté à la Mare (Ste Marie) comportant des traitements qui croisent les 3 principaux cultivars de canne à sucre Réunionnais : R570, R575, R579 et trois doses d'azote (0, 65 135 unités d'azote par hectare). L'essai comporte trois répétitions : 3 blocs sont irrigués en goutte à goutte (irrigation de complément qui n'est pas à l'optimum ETM du fait des disponibilités en eau aléatoires) et 3 blocs sont en pluvial. Les traitements azotés sont reconduits d'une année sur l'autre pour accentuer les écarts dans la nutrition et espérer ainsi accroître la variabilité des teneurs foliaires en azote. Les données de mesure interprétées couvrent trois campagnes de récolte (2004-2005-2006) et correspondent à une culture en vierge suivie de deux repousses.

Notre objectif sur cet essai est de confirmer les relations entre l'azote des feuilles et leur couleur selon le même protocole que dans l'essai préliminaire afin de valider cette méthode. L'expérimentation n'est pas destinée à vérifier les seuils de diagnostic foliaire établis par des recherches antérieures.

Les mesures correspondent à des couples de données [couleur-teneur en azote]. L'échantillonnage porte sur le tiers médian des limbes des trois premières feuilles dont la ligule est visible (feuilles sous TVD= top visible dewlap / ligule), à 5 mois après la récolte, 8 mois (pour les 3 années) et 11 mois (pour les deux premiers cycles). Sur la vierge et la première repousse, l'épaisseur des feuilles a été mesurée pour voir si sa prise en compte améliorerait la relation N-couleur. Les analyses d'azote ont été alors faites sur des pastilles de limbes prédécoupées à l'emporte pièce et pas sur l'ensemble du tiers médian de la feuille. En deuxième repousse, la méthode a été celle décrite dans l'essai préliminaire, c'est à dire sans mesurer l'épaisseur des feuilles.

Résultats

Rendements

Sur cet essai on constate que la relation entre les rendements et les traitements azotés devient significative la 3-ième année.

La première année, la vierge ne répond peu ou pas aux apports d'azote, du fait d'une fourniture importante par le sol après les travaux de plantation. Les rendements sont élevés, de 100 à 140 t/ha.

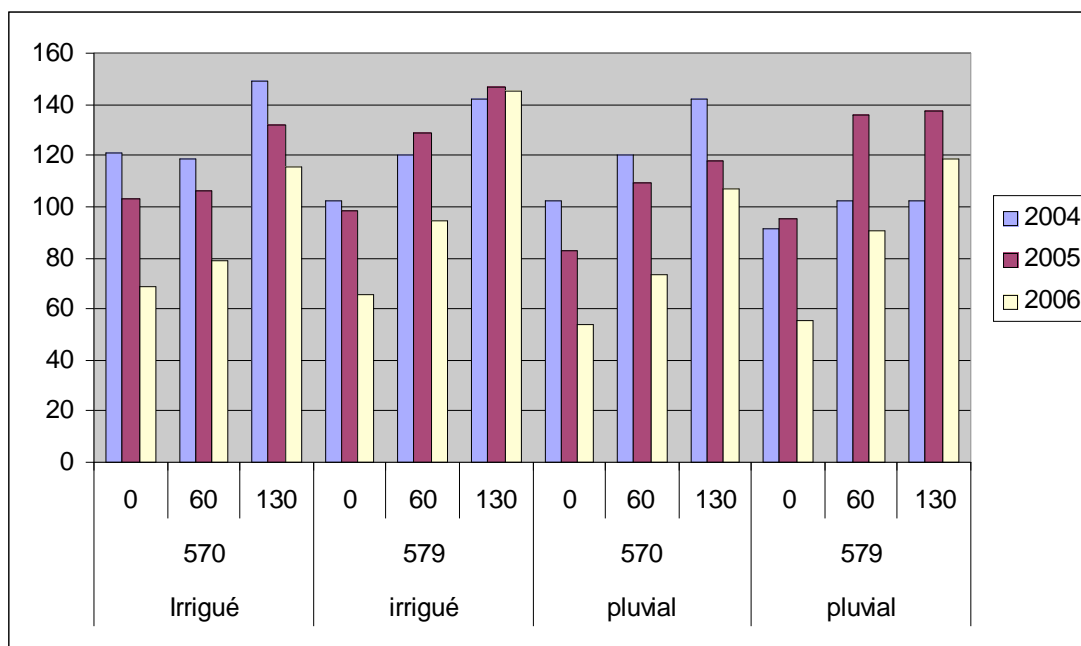
En deuxième année, les rendements chutent légèrement et répondent encore peu aux apports d'azote. Les rendements sur le traitement sans azote N0 reste encore élevé.

En 3-ième année, la réponse aux traitements N devient marquée. La réponse est similaire à celles mesurées sur d'autres essais de réponse à l'azote conduits à La Mare (Chabalier, 1992).

La R 579 donne des rendements toujours supérieurs à ceux de la R 570.

Le traitement irrigué donne des rendements un peu supérieurs à ceux du pluvial, mais ils ne sont pas au potentiel de la zone, car l'irrigation ne suffit pas aux besoins en eau de la canne à l'ETM.

figure 3 : données sur les rendements des traitements de l'essai



Relation entre l'azote et couleur

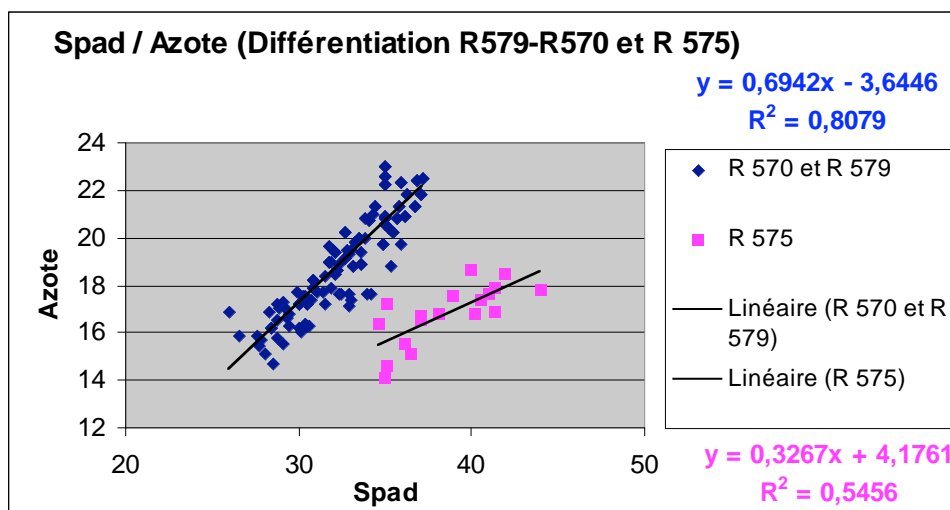
1) Pour les deux premières années,

a) régression entre N et la couleur

L'ajustement est réalisé sur 180 couples [couleur-teneur en azote]. Ils correspondent aux mesures sur 2 cycles, 3 dates par cycle, 3 blocs par date, 3 doses d'azote, 2 types d'irrigations et 3 cultivars.

La teneur en azote du limbe des trois feuilles sous TVD est fortement corrélée à la couleur (mesurée par le Spad), toutes doses, dates et cultivars confondus. Mais il y a un problème pour la variété de canne R575 qui possède des mesures SPAD plus élevées, comme l'avait déjà montré l'étude préliminaire de Pouzet.. Nous avons abandonné cette variété en année 3 car la R 575 se couche facilement avec le vent, et les mesures à faire sur les feuilles et la récolte sont donc très difficiles.

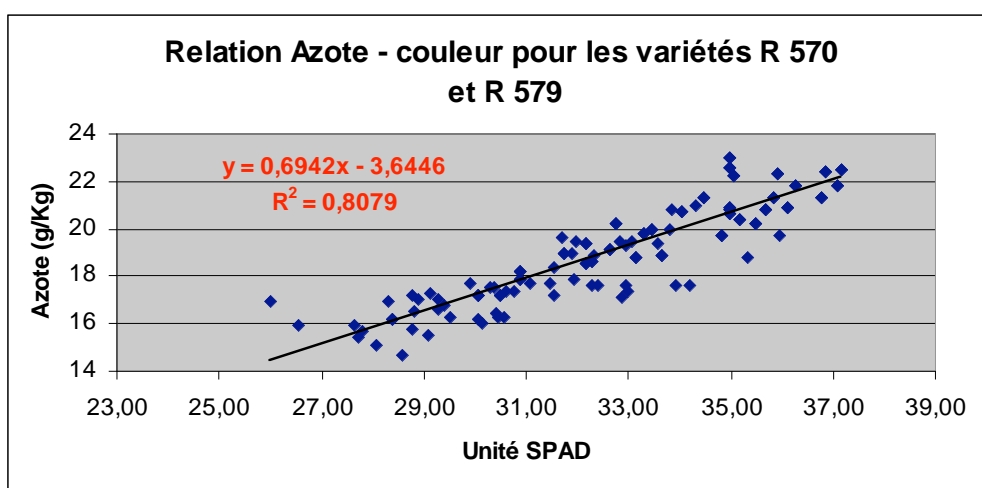
Figure 4 : relation azote et couleur des trois variétés



L'étude statistique montre qu'il est possible d'estimer la teneur en azote d'une feuille de canne à sucre (R570 et R 579) à partir d'une mesure de couleur avec une bonne précision par une régression linéaire ($R^2 = 0.8079$; $Pr > F : < .0001$), selon le modèle suivant.

$$N \text{ (g/kg)} = + 0.6942 \cdot \text{couleur (unité SPAD)} - 3.6446$$

figure 5 : relation azote et couleur avec la R 570 et R 579



b) régression N~couleur avec la prise en compte de certaines caractéristiques de la feuille

Des études menées par Araus et al en 1997 ont montré que la prise en compte de la teneur en chlorophylle et de la masse surfacique de la feuille améliorerait certaines relations. Nous avons donc pendant 2 ans mesuré l'épaisseur de la feuille ainsi que la masse surfacique en découpant des rondelles et en pesant leur poids sec. Nous avons recherché des corrélations entre N et couleur en faisant intervenir ces nouveaux paramètres.

Les corrélations obtenues sont :

Sur toutes les mesures :

N et couleur (spad)

$$R^2 = 0.59$$

N et quantité de chlorophylle (spad * poids par unité de surface)

$$R^2 = 0.31$$

N par unité de surface et couleur (spad)

$$R^2 = 0.50$$

Sur les mesures du 02-05

N et spad

$$R^2 = 0.80$$

N et spad/ épaisseur

$$R^2 = 0.79$$

Nous pouvons en conclure que la prise en compte de ces mesures n'améliore pas significativement la relation entre l'azote de la feuille et la mesure de la couleur.

2) Pour les trois années, les régressions obtenues sont :

En étudiant uniquement les deux variétés R 570 et R 579 sur les 3 années, nous avons les relations suivantes :

a) Régressions entre N et la couleur , tous traitements confondus

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.63 \text{ couleur} - 1.884$$

Residual standard error = 1.32 ; $R^2 = 0.65$ (286 couples) F-stat 531 (286 DF) ; p-value < 2.2 e-16

b) Régressions entre N et la couleur , par variété

- Régression entre N et couleur pour la R 570

$$N = 0.74 \text{ couleur} - 5.617$$

Residual standard error = 1.21 ; $R^2 = 0.74$ (142 couples) : F-stat 416 ; p-value < 2.2 e-16

- Régression entre N et couleur pour la R 579

$$N = 0.53 \text{ couleur} + 1.51$$

Residual standard error = 1.36 ; $R^2 = 0.56$ (142 couples) F-stat = 186 : HS p-value < 2.2 e-16

c) Régression entre N et la couleur pour les parcelles pluviales

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.608 \text{ couleur} - 1.099$$

Residual standard error = 1.34 ; $R^2 = 0.63$ (142 couples) F-stat 245 (142 DF) ; p-value < 2.2 e-16

d) Régression entre N et la couleur pour les parcelles irriguées

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.65 \text{ couleur} - 2.536$$

Residual standard error = 1.31 ; $R^2 = 0.65$ (142 couples) F-stat 272 (142 DF) ; p-value < 2.2 e-16

e) Régression entre N et la couleur pour la date 1 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.71 \text{ couleur} - 4.41$$

Residual standard error = 1.08 ; $R^2 = 0.79$ (106 couples) F-stat 405 (106 DF) ; p-value < 2.2 e-16

f) Régression entre N et la couleur pour la date 2 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.52 \text{ couleur} - 0.65$$

Residual standard error = 0.94 ; $R^2 = 0.73$ (106 couples) F-stat 287 (106 DF) ; p-value < 2.2 e-16

g) Régression entre N et la couleur pour la date 3 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.51 \text{ couleur} + 3.22$$

Residual standard error = 1.05 ; $R^2 = 0.50$ (70 couples) F-stat 68 (70 DF) ; p-value = 6.31e-12

h) Régression entre N et la couleur pour l'année 1 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.61\text{couleur} - 0.99$$

Residual standard error = 1.12 ; $R^2 = 0.72$ (106 couples) F-stat 274 (106 DF) ; p-value value < 2.2 e-16

i) Régression entre N et la couleur pour l'année 2 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.33\text{couleur} + 8.7$$

Residual standard error = 1.34 ; $R^2 = 0.23$ (106 couples) F-stat 31 (106 DF) ; p-value value =1.559e-07

j) Régression entre N et la couleur pour l'année 2 (2 variétés confondues)

La relation entre N et la couleur est hautement significative

$$N = 0.69\text{couleur} - 4.77$$

Residual standard error = 0.79 ; $R^2 = 0.80$ (70 couples) F-stat =283 (70 DF) ; p-value value =< 2.2 e-16

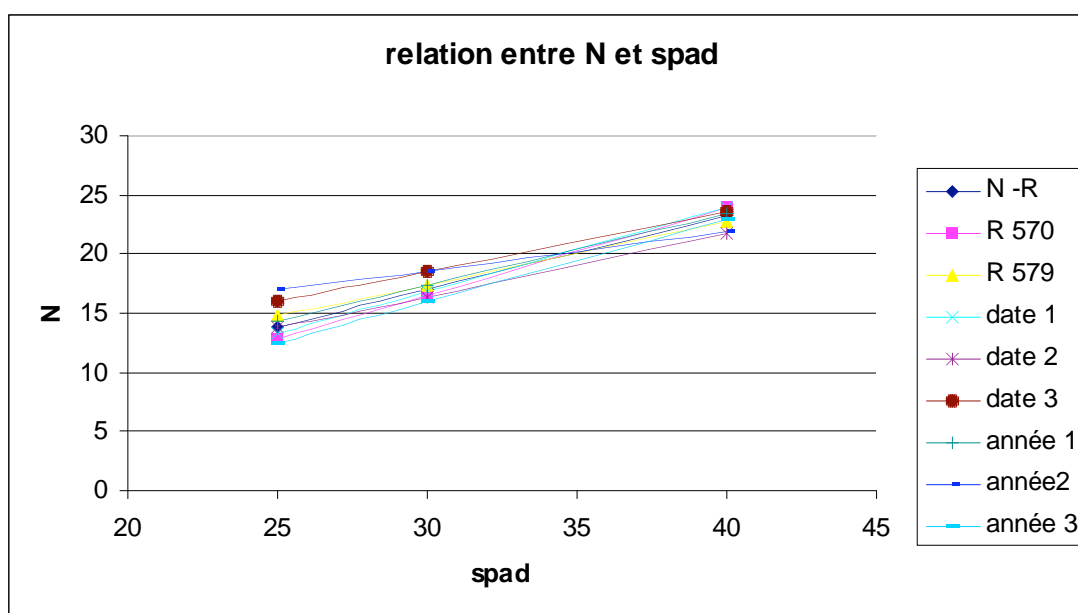
Interprétation des résultats :

Toutes les relations étudiées sont hautement significatives.

Cependant quelques différences apparaissent :

- La relation est meilleure pour la R 570 que pour la R 579
- La relation est meilleur aux dates 1 et 2 qu'à la date 3, plus tardive pour les prélèvements, ce qui confirme l'intérêt de prélever vers 5 à 7 mois.
- L'année 2, le relation est bien moins bonne que les années 1 et 3, pour une raison inconnue.

Figure 6 : relations entre la couleur et la teneur en azote des feuilles , par variété , par date, par année :



Relation entre la couleur et le rendement

Les relation sont du même type que celles entre l'azote et le rendement , à savoir que la relation devient hautement significative qu'en année 3 ($R^2 = 0,53$)

Les deux premières années les corrélations sont peu significatives ($R^2 = 0,05$ et $0,09$)

Pour la troisième année :

Rendement = 8.43 couleur -174

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -174.9983    29.3852  -5.955  9.4e-08 ***
Spad         8.4291     0.9436   8.933  3.5e-13 ***
---
```

Residual standard error: 18.15 on 70 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.5327, Adjusted R-squared: 0.5261
F-statistic: 79.8 on 1 and 70 DF, p-value: 3.503e-13

Graphiques 7 : relation entre la couleur (spad) et le rendement :

dans l'ordre (de gauche à droite): les 3 années confondues, l'année 1, puis l'année 2 et l'année 3.

